

IC タグを用いた防災施策の提言と 確率的生命価値による経済分析

谷 田 則 幸*
大 東 正 虎**
村 上 雅 俊***

要 約

産業界では、IC タグの特性である商品識別・管理技術が注目されている。しかし、その技術を公共性の高い分野に応用しようとする研究は少数である。特に、災害時に建物の中にいる人が情報を IC タグから得て避難するといった実証実験やシミュレーションモデルの構築はこれまで行われてこなかった。本稿では、小学校をモデルとして IC タグを利用した避難誘導のシミュレーションを行い、防災対策の効果について考察した。そのために、建部ら（1999）が行った単独避難の経路選択傾向のデータをもとにしてマルチエージェントシミュレーションモデルを構築し、IC タグの効果について考察を行った。

IC タグ導入に対する費用の投入には、予算の制約があるので、ある程度基準となるような費用便益を算出しておかねばならない。そこで、この施策が効率的かどうかについて検討するために確率的生命価値の推計を行った。

キーワード：マルチエージェントシミュレーション；IC タグ；避難モデル；防災施策；
費用便益；確率的生命価値

経済学文献季報分類番号：02-13；02-21；05-42

1. はじめに

本稿では小学校をモデルとして IC タグ（RFID ともいう）を利用した避難誘導のシミュレーションを行い、防災対策の効果とその費用について考察した。

2006年7月現在、経済産業省のホームページでは、2004年度に実施した IC タグ実証実験の結果が公開されている。実証実験に参加した業界は7業界あり、①建設機械、産業車両、農業機械業界②出版業界③家電製品、電子部品、電子機器業界④医薬品業界⑤百貨店業界⑥

* 関西大学経済学部 E-mail: tanida@kansai-u.ac.jp

** 関西大学大学院社会学研究科博士課程後期課程 E-mail: daito@rcss.kansai-u.ac.jp

*** 関西大学大学院経済学研究科博士課程後期課程 E-mail: murakami@rcss.kansai-u.ac.jp

物流業界⑦レコード、DVD・CD業界である。

IC タグには、アンテナと微小な IC チップが埋め込まれており、識別コードなどの情報が記録されている。そして、電波を使って管理システムと情報を送受信する能力を持つ。このような特性を利用して、産業界では、バーコードに代替する商品識別・管理技術として研究が進められてきたが、それに留まらず社会の IT 化・自動化を推進する上での基盤技術として注目が高まっている。それゆえ IC タグの使われ方は、流通、医療・薬品、食品、教育、道路・交通、金融、消防・防災など多岐にわたる。

しかしながら、経済産業省の IC タグ実証実験を担ったのは、IC タグ利用による営業利益の増大を見込んだ業界が中心であり、防災のような公共性の高い分野での IC タグ利用に関する研究はそれほど行われていないというのが実情である。

2005年末の奈良県、広島県、栃木県で起きた相次ぐ小学生の誘拐殺人事件に相俟って、防犯意識が高まり、その手段のひとつとして、IC タグの公共目的での用途が注目されている。たとえば、大阪府では、民間企業と共同で2005年12月から「IC タグを活用した生徒の安全・安心確保システム構築事業」の実証実験を吹田市立古江台中学校で行っている。具体的には、敷地を囲むフェンスに防犯カメラを設置し、校門に防犯カメラと専用アンテナを設置するというものである。教職員や生徒は、防犯ブザー付きの名刺サイズのアクティブ型無線 IC タグを携帯する。このアクティブ型無線 IC タグは、バッテリーを内蔵し、それ自身の識別子を定期的に発信してリーダで読み取るものである。タグを持たない人が校門を通過した場合、職員室のモニタに警告が表示され、防犯カメラが録画を始めて不審者の情報を収集する。タグを持った生徒が登下校時に通過した場合、保護者までメールが通知されるという仕組みである。

このように防犯というニーズに伴って、IC タグの公共目的での必要性は高まっているものの、実用的な用途に関する研究はまだ始まったばかりである。特に、防災と言った観点から研究された事例は少ない。

過去の防災に関する研究では、避難経路選択の研究が小学校を事例としていくつか行われている。このような過去のデータを用いて IC タグ導入による効果を検証することで、大型施設において安全かつ効率的な避難行動をとることが可能になるかもしれない。たとえば、小学校火災の頻度は少ないが、一度火災になるとその被害は大きい。それは、デパートのような大型施設についても同様である。つまり避難経路の情報を与えることによってその惨事を軽減することができるのであれば、IC タグを導入するメリットは大きくなる。そして、そのリスク削減にかかる費用と便益について分析することで、この施策提言はこれからの防災政策の研究にも貢献できるものと考えられる。

2. IC タグを使用した避難シミュレーションの必要性

小学校を対象にした避難に関する研究には、建部ら (1999) がある。火災の際に小学校の児童が単独で火災室を回避して避難出来るかどうかを調べるために、あらかじめ各児童に平面図上で、現在地、火災室、避難場所を理解させた上で彼らがどのような避難行動を取るかが調べられた。また、鈴木ら (1999) では、主に児童の学校空間の認知と避難経路選択との関係について研究がなされている。

さらに、小学校を対象にして、シミュレーションを用いた避難に関する研究には、吉岡ら (2004) がある。主に、シミュレータを使って児童に火災の疑似体験を行わせるものである。

マルチエージェントを使用した避難の研究には、椎名ら (2005) がある。その対象は100万人という大規模の群集に対して携帯電話のGPS機能を使って誘導の指示をするものである。ただし、個別に指示を出すことは不可能であるので、複数の利用者に同一の指示を出すものである。我々の研究においては個別に指示を出すので、この点で異なる。

IC タグと防災についての研究として滝澤ら (2005) があるが、その考察の対象は、災害時における外部からの救助活動に活用する利用法や電柱にIC タグをつけて避難場所の情報を付加する利用法である。その研究は主に救助の際にIC タグが活用されるというもので、避難に用いられるものではない。

災害時に建物の中にいる人がIC タグから得た情報に従って避難するといった実験はなされておらず、コンピュータによるシミュレーションさえほとんど行われてこなかった。

以上の点から、我々は、災害時のIC タグ利用の費用便益についてマルチエージェントシミュレーションモデルを用いて考察した。以下で、我々のモデルの概要を示す。

3. 児童の単独避難行動とIC タグ情報の必要性

建部らは火災の際に小学校の児童が単独で火災室を回避して避難出来るかどうかを調べるために、小学生2年生、4年生、6年生の被験者総数2471人に対して実験を行っている。この研究においては、あらかじめ各児童に平面図上で、現在地、火災室、避難場所を理解させた上で彼らがどのような避難行動を取るかが調べられた。実験では火災室を回避した児童数をクラス全体の人数で割った比率を「回避率」としている。表1に示すように、火災室が自分の教室と同一階にある場合の避難においては、低学年になるほど避難が困難なものが増加している。また、火災室が教室の下階にある場合の非同一階の回避率は、6年生で46.2%になり、同一階のケースと比べてかなり低くなる。4年生についても同様の傾向が見られるが、低学年になるにつれて立体的な空間の把握力が困難になり、日常的に使っている経路を

表1 同一階の回避率

学 年	回 避 率 (%)
6 年 生	80.3
4 年 生	54.0
2 年 生	19.2

(出所) 建部謙治・鈴木賢一・小森圭一 (1999), p.163, より著者が作成

選択してしまう傾向にある。

避難時に誘導員がいれば、空間の把握力に困難があっても安全に避難行動がとれるが、休み時間や放課後の時間に火災が起きた場合は、児童は単独で避難しなければならない。従来から行われている校内放送等の情報伝達のみでは、現在地と火災室との位置関係が正確に伝わりにくいため、立体的な空間の把握が困難な児童に対して的確な指示ができない。建部らの実験から、児童が現在地と火災室を的確に把握して安全に避難することは困難である。

このような問題を解決する方法として、IC タグの利用が有効である。IC タグには ID を識別する能力があるため、IC タグリーダーが情報をキャッチできる電波の範囲以内に IC タグを身につけた児童がいれば、その児童がどこにいるかを正確に把握することができる。このような IC タグの特性を応用して、避難行動をとる児童に火災室の場所の情報を与え、またどの通路が混雑しているのかがわかれば、安全かつ効率的に避難行動をとることができると考えられる。

4. シミュレーションモデル

4-1 エージェントの持つ属性と行動ルール

本稿では、建部らが行った単独避難の経路選択傾向のデータをもとにして児童エージェントの行動ルールをモデルに組み込んだ。また、IC タグから得た情報を表示するエージェントとしてモニタエージェントを組み入れた¹⁾。IC タグの有無にかかわらず、基本的に児童エージェントが取る行動ルールは以下のとおりである。

- (1) 基本的には、日常的に使っている経路を用いて避難する²⁾。
- (2) 自身の進行方向に対して1つ前のセルを見ながら移動し、進行方向に他の児童エージェントが存在する場合、それに後続して並ぶ。
- (3) 他のエージェントに後続して並んだ後、逆方向の通路に児童エージェントがいなければ、Uターンして逆方向の通路に出る³⁾。

児童エージェントは、通常避難（IC タグを持たないで避難）の場合に火災が発生すると、

先に示した行動ルール (1) ~ (3) をもとに、自らが日常的に利用する経路を通して避難する。IC タグがある場合には、各階の階段の混雑状況についての情報をモニタエージェントが受け取り、児童エージェントに指示を出す。児童エージェントはその情報をもとに、より混雑の少ない階段を選んで避難する。また、モニタエージェントは、基本的に、火災の発生場所に児童エージェントが近づかないように情報を与え続ける。

また、教室を出る際の行動は、階段や出口に近い方を選択して出る⁴⁾。IC タグがある場合には、モニタエージェントに近い方を選択して出る⁵⁾。

4-2 児童エージェントとモニタエージェントの配置

図1に示すとおり、我々は、理科室で火災が発生した場合、給食室で火災が発生した場合と同時火災が起こった場合の3パターンを構築した。そして、IC タグがある場合と無い場合という2パターンを加え、更に、高学年が最上階、低学年が最上階という2パターンを加えている。また、全員が6年生というモデルを作成した。表2に示すように、合計18のモデルを構築した。

6階に理科室と4クラス、5階に4クラス、4階に4クラス、3階に4クラス、2階に4クラス、1階に4クラスと給食室を配置した。1クラス当たりの児童エージェント数を20にし、合計24クラスに児童エージェントを配置した。児童エージェントの総数は480である。シミュレーションモデルでのエージェントの初期配置は、図2のようになる。実際の学校の校舎は3次元であるが、シミュレーションにおいては、2次元で表現せねばならないので、教室と廊下とを合わせて1つの階としている。

表3は建部らが示した学校での避難訓練時に想定される火災の発生場所である。これに

6階	⇒	6学年	6学年	理科室	6学年	6学年
		児童数20	児童数20		児童数20	児童数20
5階	⇒	5学年	5学年		5学年	5学年
		児童数20	児童数20		児童数20	児童数20
4階	⇒	4学年	4学年		4学年	4学年
		児童数20	児童数20		児童数20	児童数20
3階	⇒	3学年	3学年		3学年	3学年
		児童数20	児童数20		児童数20	児童数20
2階	⇒	2学年	2学年		2学年	2学年
		児童数20	児童数20		児童数20	児童数20
1階	⇒	1学年	1学年	給食室	1学年	1学年
		児童数20	児童数20		児童数20	児童数20

図1 高学年が最上階の場合の教室配置と児童エージェントの数

従って、火災の発生場所を理科室と給食室に限定した。また、実際の小学校の配置を参考に、我々のシミュレーションモデルでは、1階に「給食室」、6階に「理科室」を配置した。なお、校舎の廊下は、片側に2エージェントが通り、同時に4エージェントが通れる幅とした。また、階段は、片側に1エージェントが通り、同時に2エージェントが通れる幅とした。

表2 シミュレーションのパターン

ICタグ有無	児童の配置		高学年上階	低学年上階	全員6年生
	教室				
ICタグ無し	理科室		モデル1	モデル7	モデル13
	給食室		モデル2	モデル8	モデル14
	同時火災		モデル3	モデル9	モデル15
ICタグあり	理科室		モデル4	モデル10	モデル16
	給食室		モデル5	モデル11	モデル17
	同時火災		モデル6	モデル12	モデル18

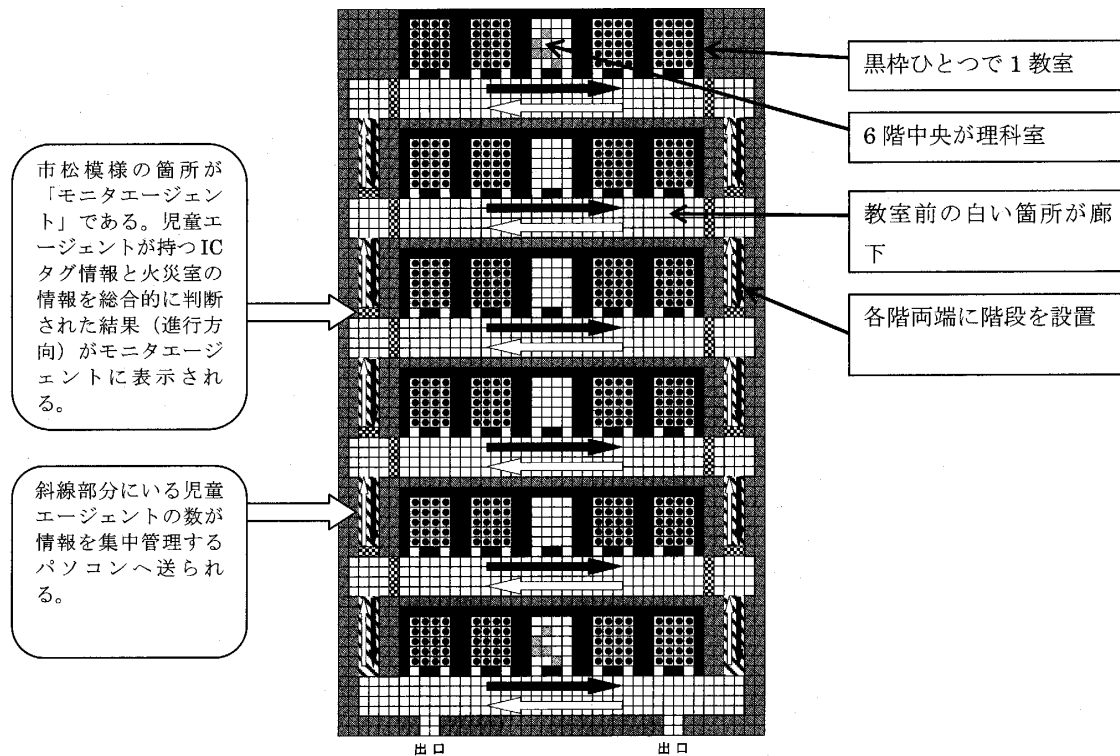


図2 エージェントの配置図

表3 避難訓練時に想定される火災の発生場所（複数回答）

教室	割合 (%)
給食室	81.8
理科室	36.4
家庭科室	27.3

(出所) 建部謙治・鈴木賢一・小森圭一 (1999), p.162, より著者が作成

た。

モニタージェントは、基本的に各階の両端と階段を降りたところに設置した。ただし、1階にある階段を降りた所には、設置していない。

5. シミュレーションの実行

火災発生時に児童エージェントが通常避難（IC タグを使用しない）行動をとった場合と、モニタージェントから火災室と階段の児童数についての情報を得ながら避難（IC タグを使用）する場合とで、どのような差異が発生するのかを考察した。

上記の18モデルについて、各30回ずつシミュレーションを行った。全児童エージェントが校舎から避難した時点がシミュレーションの終了時点である。分析に用いるデータは、下記の6つである。

(1) 火災室前を通過した児童エージェント数（学年別）

(2) 回避率 = $\frac{(\text{全児童数} - \text{火災室を回避できなかった児童数})}{\text{全児童数}} \times 100$

(3) 学年別回避率 = $\frac{(\text{学年別児童数} - \text{火災室を回避できなかった学年別児童数})}{\text{学年別児童数}} \times 100$

(4) 最終ステップ数

(5) ステップ開始からの避難時間（学年別）

(6) 250ステップ目で残っている児童エージェントの数

データ (1)、(2)、(3) は実際に児童エージェントがモニタージェントより情報を得ることで、どれだけ安全に避難出来たかを示すデータであり、ステップ毎に集計している⁶⁾。データ (4)、(5)、(6) は、どれだけ早く避難できたかを示すデータである。

このように、我々は、児童エージェントが安全に避難することに加えて避難行動の時間も集計できるようにした。

6. シミュレーションの結果と考察

各モデルのシミュレーションを30回ずつ行い、学年毎のステップ数と回避率の平均をグラフ化した。通常避難行動の場合も IC タグを使用した場合も回避率は、火災現場が「給食室」、「理科室」と「同時火災」の場合で異なることから、火災場所によるケースの結果から考察を行った。

また、全体での比較を行うため、全学年の平均もグラフ化した（図3から図20）。各グラフのX軸側の目盛が異なるのは、モデルごとに避難完了ステップ数（避難完了時間）が異なるためである。避難時間についても比較を行うため、学年毎に避難完了したステップ数を平均して表にした（表4）。

6-1 理科室火災の場合

「理科室」は6階に位置し、主に6階にいる児童エージェントが避難行動を取る際に火災室前を通過することが多い。特徴は、ステップの初期段階で火災室の前を通過する児童エージェントが増え、ある程度ステップが進むと、回避率はあまり下がらないことである。

通常避難のモデルで高学年を最上階に配置した場合（モデル1）、図3に示すように6年生の回避率はステップの初期から420ステップ目あたりまで急激に低下し続けるが、以降は緩やかに低下して、最終的には58.42%になる。また、図4に示すように低学年を最上階に配置した場合（モデル7）、1年生の回避率はステップの初期から200ステップを越えるあたりまで急激に低下し続け、15.75%でステップを終了する。このように学年別の初期配置によって回避率の推移に差が生じる。特に低学年を最上階に配置した場合は低学年の回避率が下がる。こうした事態は、建部らの研究と合致する。つまり教室と同一階で火災が発生した場合、避難行動を取る際に低学年ほど避難が困難な者が増加する傾向にある。そのため、低学年になるにつれて火災室前を通過してしまう傾向にある。

ICタグを使用したモデルで高学年を最上階に配置した場合（モデル4）、図5に示すように6年生の回避率はステップの初期から100ステップ目まででも6%程度しか下がらない。しかし、図6に示すように低学年を最上階に配置した場合（モデル10）、1年生の回避率はステップのはじめの方から300ステップ目あたりまで緩やかに低下して、最終的には36.50%でステップを終了する。これは、モニタエージェントの情報を高学年ほど信頼する設計になっているため、6年生がより良く回避できていることを示す。通常避難のモデルとICタグを使用したモデルを比較すると、回避率はいずれの場合でも後者の方が向上していることがわかる。

また、通常避難の場合のモデル1とモデル7の平均を全員6年生のモデル（モデル13）の平均と比較したが、図7に示すように低学年を最上階に配置した場合は回避率が最終的に80.17%になる。図8に示すとおり、ICタグを使用した場合のモデル4とモデル10の平均を全員6年生のモデル（モデル16）の平均とを比較しても低学年を最上階に配置した場合は回避率が最終的に88.59%になる。

このように、いずれのモデルにおいても低学年の初期配置を火災室より下階に配置した方

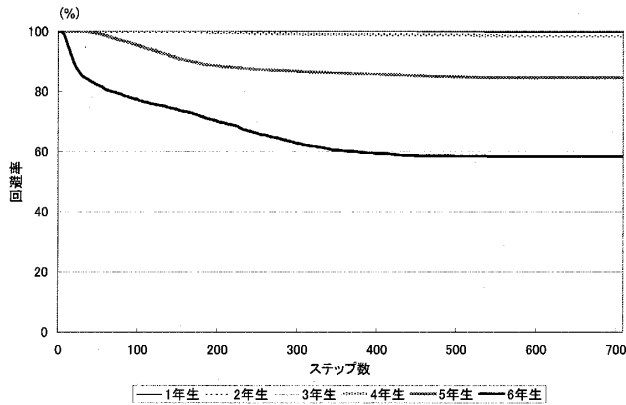


図3 モデル1の学年別回避率の推移

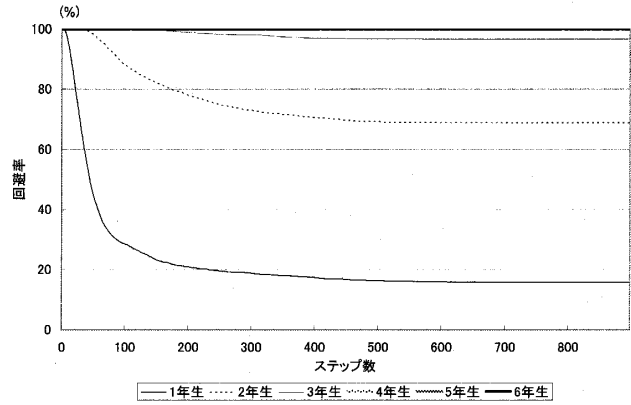


図4 モデル7の学年別回避率の推移

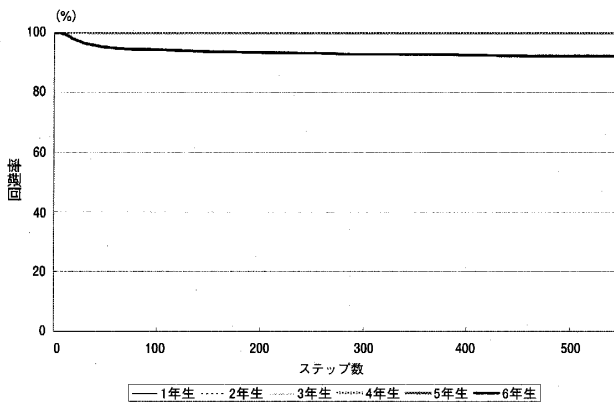


図5 モデル4の学年別回避率の推移

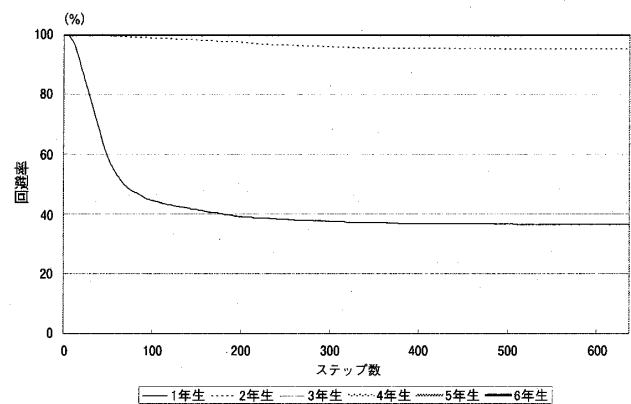


図6 モデル10の学年別回避率の推移

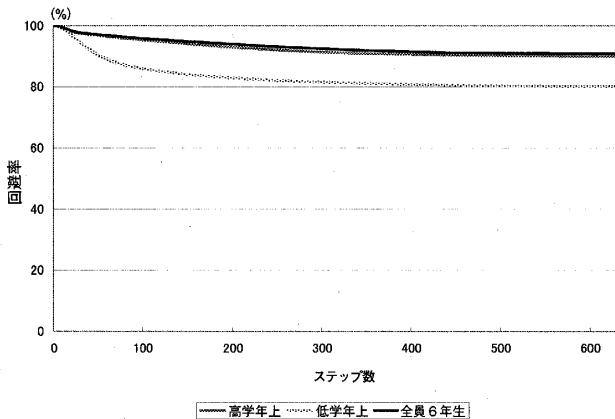


図7 モデル1、モデル7、モデル13の回避率の推移

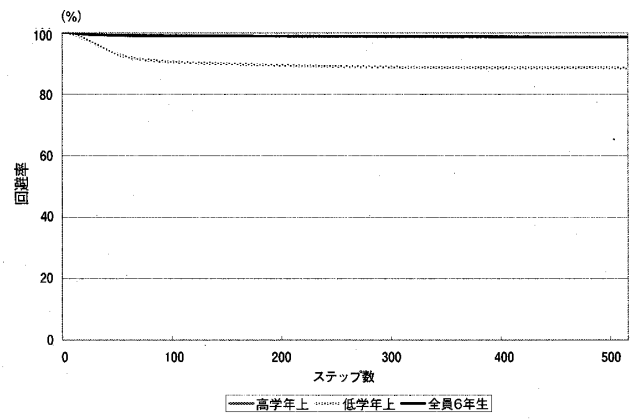


図8 モデル4、モデル10、モデル16の回避率の推移

が回避率は向上することが示唆された。また、モニタエージェントの情報を信頼する高学年の方が回避率は向上することが示唆された。

6-2 給食室火災の場合

「給食室」は、1階に位置している。上階から降りてきた児童エージェントが順次出口に向かって避難する。特徴は、ステップが開始してから次々と火災室前に接近して避難するこ

とである。ただし、学年毎の教室の初期配置が火災室に近い学年から順番に火災室前に接近する傾向にあるので、回避率の下がるタイミングは学年毎に異なる。

通常避難のモデルで高学年を最上階に配置した場合（モデル2）、図9に示すように6年生の回避率は、ステップの初期においては下がらないが、154ステップ目から急速に下がり、最終的には88.13%になる。1年生は、ステップの開始後すぐに回避率は下がるが、200ステップ目あたりからあまり下がらず、51.17%でステップを終了する。また、低学年を最上階に配置した場合（モデル8）、図10に示すように1年生の回避率は139ステップ目から急速に下がり、最終的には51.17%になる。6年生は、ステップの開始後すぐに回避率は下がるが、40ステップ目あたりからあまり下がらずに、82.42%でステップを終了する。

モデル2とモデル8の1年生を比較すると、火災室と同一階にいるときよりも非同一階にいる時の方が回避率は下がっている。こうした事態もまた、建部らの研究と合致する。火災室が教室と非同一階の場合、同一階の場合よりも避難が困難な者が増加する傾向にある。また、その傾向は、低学年になるほど顕著である。

ICタグを使用したモデルで高学年を最上階に配置した場合（モデル5）、図11に示すように高学年の回避率はステップの初期からあまり下がらない。低学年になるほど最終的に回避率が下がる。また、低学年を最上階に配置した場合（モデル11）も、図12に示すように高学年の回避率はステップの初期からあまり下がらない。低学年になるほど最終的に回避率が下がる。これは、モニタエージェントを信頼する学年の順番に従って差が出ていると考える。通常避難のモデルとICタグを使用したモデルとを比較すると、回避率はいずれの場合でも後者の方が向上していることがわかる。

また、通常避難の場合のモデル2とモデル8の平均を全員6年生のモデル（モデル14）の平均と比較したが、図13に示すように全員6年生のモデルは他のモデルに比べて回避率が高い。しかし、低学年を上配置したモデルは、高学年を上配置したモデルよりも回避率が高くなる。図14に示すとおり、ICタグを使用した場合のモデル5とモデル11の平均を全員6年生のモデル（モデル17）の平均と比較すると通常避難の場合と同様の結果が得られた。

いずれのモデルにおいてもモニタエージェントの情報を信頼した方がより回避率が向上することが示唆された。

6-3 同時火災の場合

「同時火災」の場合、「理科室」火災の場合と「給食室」火災の場合の両方の条件が重なるため、とりわけ教室の初期の配置が6階に位置する学年は、回避率が大幅に下がる傾向にあ

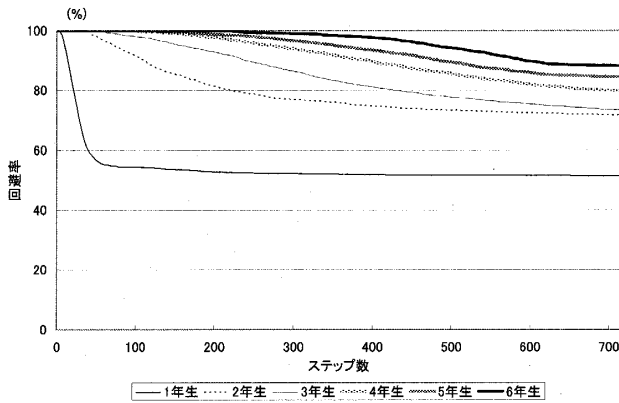


図9 モデル2の学年別回避率の推移

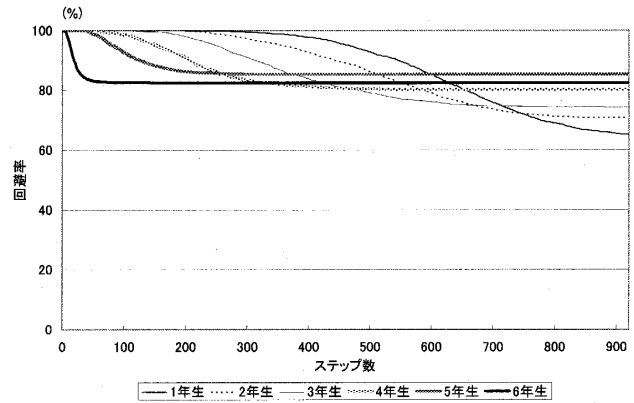


図10 モデル8の学年別回避率の推移

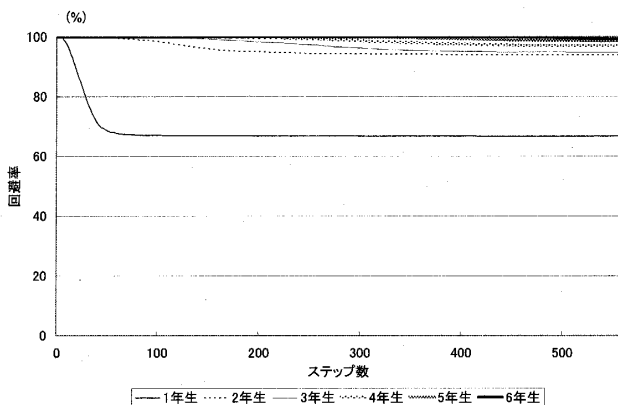


図11 モデル5の学年別回避率の推移

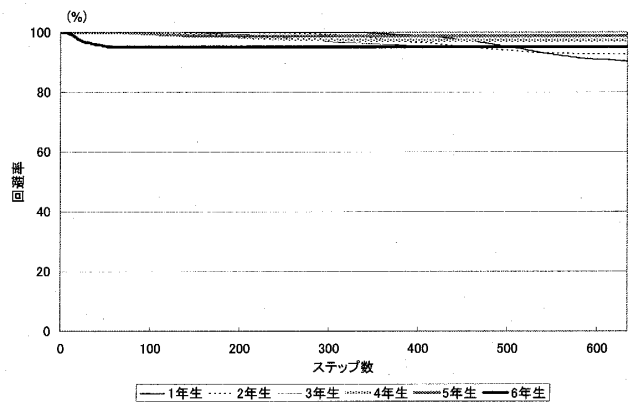


図12 モデル11の学年別回避率の推移

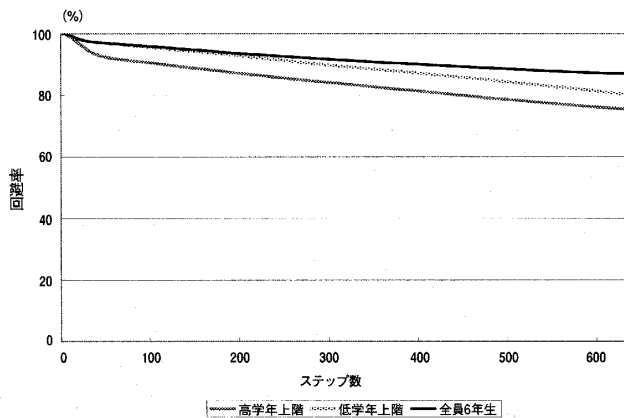


図13 モデル2、モデル8、モデル14の回避率の推移

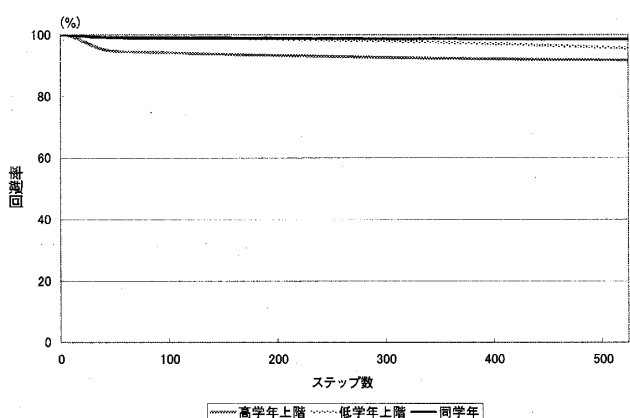


図14 モデル5、モデル11、モデル17の回避率の推移

る。

通常避難のモデルで高学年を最上階に配置した場合 (モデル3)、図15に示すように6年生の回避率は、ステップ開始後から急速に下がりはじめ、30ステップ目あたりから緩やかに下がり、最終的には51.63%になる。1年生も同様にステップの開始後すぐに回避率は下がるが、60ステップ目からあまり変化せずに53.04%でステップを終了する。また、低学年を最上階に配置した場合 (モデル9)、図16に示すように1年生の回避率はステップ開始後から急速に下がりはじめ、80ステップ目あたりから緩やかに下がり、最終的には9.63%になる。

6年生は、ステップの開始後すぐに回避率は下がるが、60ステップ目あたりからあまり変化せずに80%でステップを終了する。モデル3の場合、6年生は、6階と1階の火災室で2回、回避率が下がるリスクを負っている。1年生は1階でのみ回避率が下がるリスクを負う。モデル9では、その逆が示されたため、1年生の回避率が大幅に下がっている。

ICタグを使用したモデルで高学年を最上階に配置した場合（モデル6）、図17に示すように高学年の回避率はステップの初期からあまり下がらないが、1年生の回避率は6年生の回避率に比べて24.59%下がっている。また、低学年を最上階に配置した場合（モデル12）も、図18に示すように高学年の回避率はステップの初期からあまり下がらない。1年生の回避率が他の学年に比べて大幅に下がっているのは、モニタエージェントを信頼する確率が比較的低いのと火災室に接近する機会が2度あるためだと考える。通常避難のモデルとICタグを使用したモデルを比較すると、回避率はいずれの場合でも後者の方が向上していることがわかる。

また、通常避難の場合のモデル3とモデル9の平均を全員6年生のモデル（モデル15）の平均と比較したが、図19に示すように全員6年生のモデルの場合は他のモデルに比べて回避率が高い。図20に示すとおり、ICタグを使用した場合のモデル6とモデル12の平均を全員6年生のモデル（モデル18）の平均と比較すると低学年を最上階に配置したモデルの回避率は相対的に下がるのがわかる。

いずれのモデルにおいてもモニタエージェントの情報を信頼した方がより回避率が向上することが示唆された。

6-4 避難時間の結果と考察

回避率を考察した結果、ICタグを使用した方がより良い結果が得られることがわかった。次に、避難時間がどれだけかかったかをステップ数によって考察する。表4は、各モデルを30回ずつシミュレーションして、その平均値と標準偏差、最大値、最小値を表にしたものである。

全体的に共通しているのは、最終ステップ数をみると、ICタグを使用した場合の方が、通常避難の場合よりも早く終了している。また、250ステップ目で残っている児童もICタグを使用した場合の方が、通常避難の場合よりも早く終了している。

ただし、高学年を最上階に配置した場合より、低学年を最上階に配置した場合の方が早く避難ができています。これは、下の階に配置された高学年が早く避難を完了させていると考えられるからである。

このように、ICタグを使用した場合の方が、通常避難の場合よりも早く避難を完了でき

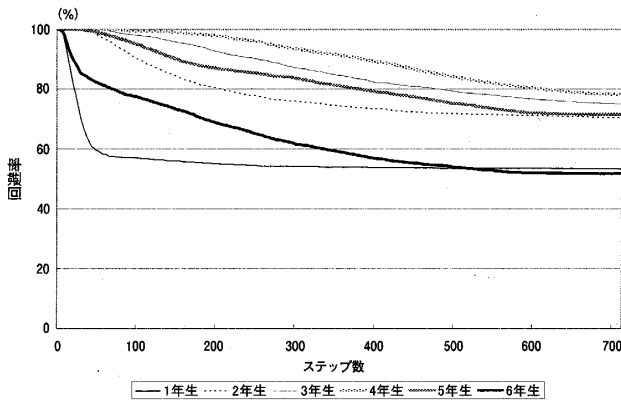


図15 モデル3の学年別回避率の推移

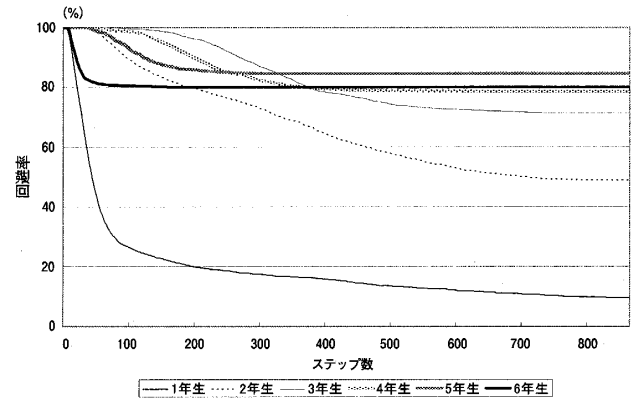


図16 モデル9の学年別回避率の推移

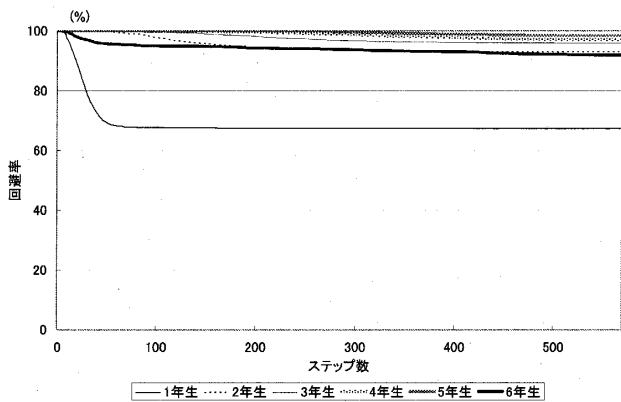


図17 モデル6の学年別回避率の推移

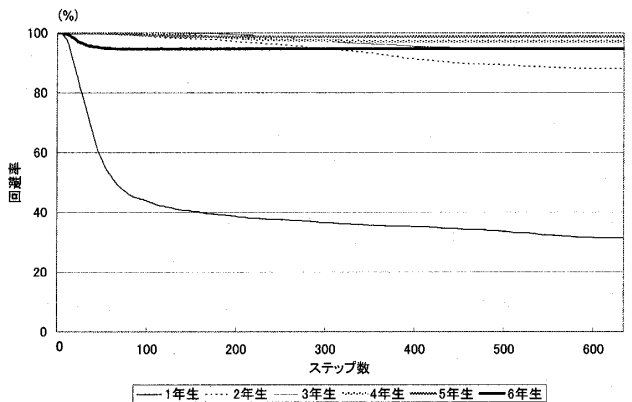


図18 モデル12の学年別回避率の推移

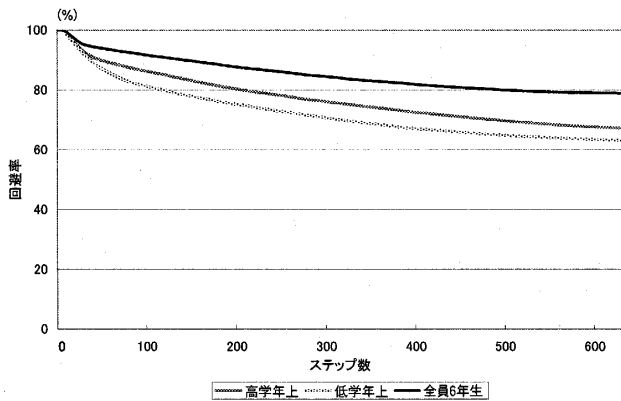


図19 モデル3、モデル9、モデル15の回避率の推移

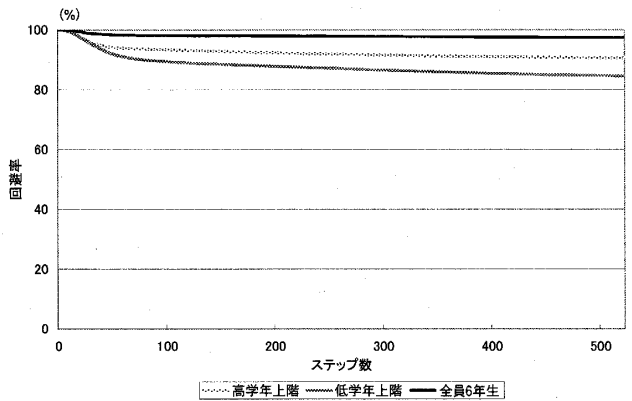


図20 モデル6、モデル12、モデル18の回避率の推移

るのは、階段での混雑状況をうまく振り分けているからだと考えられる。また、IC タグを使用した場合に標準偏差の値が小さくなっているのは、避難時間の向上とともに、より安定した時間内で避難できることを示唆している。

7. 火災避難行動のリスクに対する確率的生命価値の経済分析

7-1 リスク分析の手法

小学校における火災避難行動のシミュレーションの結果から、IC タグを使用すると回避

表4 250ステップ目の残りの児童と最終ステップ数

			理科室		給食室		同時火災	
			最終 ステップ数	250ステップ 残りの児童	最終 ステップ数	250ステップ 残りの児童	最終 ステップ数	250ステップ 残りの児童
高学年を最上階に配置	ICタグなし (モデル1)	平均値	809.50	286.50	819.67	286.73	815.10	284.80
		標準偏差	84.11	17.71	63.26	11.00	66.35	12.19
		最小値	709.00	270.00	716.00	261.00	713.00	266.00
		最大値	915.00	313.00	962.00	312.00	971.00	327.00
	ICタグなし (モデル4)	平均値	604.60	244.90	608.60	247.40	599.20	247.33
		標準偏差	26.81	6.74	28.59	8.22	27.44	6.56
		最小値	546.00	232.00	559.00	233.00	569.00	233.00
		最大値	664.00	260.00	659.00	263.00	673.00	265.00
低学年を最上階に配置	ICタグなし (モデル7)	平均値	1010.70	248.07	1018.07	247.50	1014.67	249.70
		標準偏差	90.84	4.95	56.93	5.46	78.24	4.09
		最小値	898.00	234.00	920.00	239.00	865.00	241.00
		最大値	1294.00	265.00	1136.00	263.00	1187.00	258.00
	ICタグなし (モデル10)	平均値	694.13	227.57	691.63	223.27	703.20	225.40
		標準偏差	37.81	3.30	34.14	3.68	44.77	4.63
		最小値	637.00	221.00	635.00	217.00	634.00	217.00
		最大値	788.00	236.00	755.00	231.00	818.00	235.00

率と避難時間ともに向上することがわかった。しかし、ICタグを実際に小学校に導入する場合、回避率の向上に対する費用の投入には、予算の制約があるので、ある程度基準となるような費用を算出しておかねばならない。

この点について、古川ら（2004）はリスク管理の戦略として、あらゆるリスクを排除しようとする「ゼロリスク戦略」と一定レベル以上のリスクを許容しない「等リスク戦略」を挙げている。リスクの要因の因果構造にはかなりの不確実性があるので、完全なゼロリスクの達成や常に一定の定められたレベルへの軽減は、技術的に不可能である。また、技術的に可能であった場合でも、投入しうる資源には限界があるとしている。つまり、「ゼロリスク」を求めるならば、費用をどんどん投入して、その対策を実行せねばならないが、実際に対策にあてられる費用は有限であるので事実上不可能である。

このように防災施策の実行をするためには、リスクの削減に対する費用便益の分析を行う必要がある。費用便益分析の方法は、火災死亡リスクに対する確率的生命価値（VSL: Value of Statistical Life）によって推計する。VSLとは、古川らによると、ある事象に起因する確率的死亡を回避するための支払意思を集計し、便宜的に1人の確率的死亡を回避するための支払意思額（WTP: Willingness To Pay）を算出したものである。ここで確率的死亡とは、日常生活の中で発生する死亡のリスクである。そのときVSLは、次式によって得られる。

$$VSL = \frac{\text{(死亡リスク削減率に対する WTP)}}{\text{死亡リスク削減率 (RR)}}$$

さらに、1人当たりの死亡リスク削減率 (RR: Risk Reduction Rate) に対する WTP は、集団の構成員の人数を乗じることで、集団としての VSL が得られる。つまり、生命に対するリスクを削減することのみを目的とした場合、確率的に一人の生命を救うためにかかる施策の費用が VSL を上回るのであれば、その施策は非効率となる。

この分析を行うためには、RR に対する WTP による計測を行わなければならない。RR に対する WTP を計測する方法は、主に、顕示選好法 (RPM: Revealed Preference Method) と表明選好法 (SFM: Stated Preference Method) によって求められる。

RPM は、人々が実際に市場取引しているデータから、WTP を類推する。また、SFM は、直接的に WTP についてアンケートで質問する方法である。

児童の VSL について分析を行う場合、大人の場合と同じように、RR に対する WTP を質問することは現実的ではない。また、児童は労働力人口には入らないので、稼得能力で測ることもできない。そのため、便宜的に独立行政法人日本スポーツ振興センターが公表している災害共済給付のデータとシミュレーションの結果に基づいてリスクの試算を行う。

7-2 シミュレーションで得られた結果からの推計

小学校における火災死亡事故は、発生頻度が低いと考えられる。しかし、建部らが行った、単独避難選択傾向のデータから考察すると、小学校のような集合施設において単独避難をせざるを得ない状況におかれた場合、火災の頻度は少なくとも回避率が低ければ、被害は大きくなるものと推測される。

災害共済給付制度は、学校の管理下における児童生徒等の災害 (負傷、疾病、障害又は死亡) に対して、災害共済給付 (医療費、障害見舞金又は死亡見舞金の支給) を行うものである。全国の小学生児童のうち約99.9%が加入しており、保護者負担は4割から6割となっている。

通常、損害に対するリスクは、焼損被害、消火水による被害など、火災によって直接的に損なわれるものと学校閉鎖、民事上の賠償責任といった間接的に損なわれるものがある。しかし、IC タグを使用した児童の避難行動については、児童の危険回避のみが対象となるため、直接的なリスクの中でも死亡だけを取り扱う。また、火災室を回避できなかった児童は死亡することを前提として推計を行う。

2004年度の災害発生の場合別の死亡見舞金給付件数のうち、休憩時間に発生したものは2件である。そこで、休憩時間の小学校火災において毎年2件の死亡者が出ると仮定する。

2004年度の全国の小学校在学者数は7,200,933名である。すると児童の火災死亡発生確率(ap)は次式のように求められる。

$$ap = \frac{2}{7200933} \times 100$$

$$= 0.000028$$

となる。ただし、1年間で2名死亡する確率を仮定するだけなので、T. T. Lie (1974) が主張するような、出火率の計算からなされているわけではない。

通常避難の場合で火災室を回避できなかった児童数を $NonICt$ とし、IC タグ使用の場合で、火災室を回避できなかった児童数を ICt とすると、次式のようになる。分母はシミュレーションの全児童エージェント数である。次式には、 $NonICt = 121.87$ 、 $ICt = 39.50$ を代入する。

$$RR = ap \times \frac{(NonICt - ICt)}{480} \times 100$$

高学年を最上階に配置して給食室で火災が起きた場合、次の結果が得られた。

$$RR = 0.00048$$

もし小学校において単独火災避難行動をとった場合に1年間で0.00048%死亡リスクが削減される場合、リスク削減率に対するWTPは、次式によって算出される。ただし、現在の掛金は表5のとおりであり、沖縄県とそれ以外の地域とを分けて算術して平均すると、1人当たり913.36円となる。また、ICタグ導入の生存率は、回避率に ap を乗じたものである。また、通常避難の生存率は、回避率に ap を乗じたものである。すなわち、今まで、支払っていた生存率に対する支払額よりも、ICタグ導入によって、さらに生存率が向上することで、WTPの額もその割合に応じて上がるという考え方である。

$$IC \text{ タグ導入の生存率} = 91.77 \times 0.000028$$

$$\text{通常避難に生存率} = 74.61 \times 0.000028$$

$$(WTP : IC \text{ タグ導入の生存率} = 913.36 : \text{通常避難の生存率}) - 913.36$$

$$WTP = 1123.42 - 913.36$$

$$WTP = 210.06$$

さらに、WTPをVSLの式に代入すると次式のようになる。

$$VSL = 440,755.01$$

たとえば、吹田市の小学生全員(20,457名)が210.06円のWTPを持った場合、

$$VSL = 9,016,525,184.87$$

となる。

表5 災害共済給付制度における共済掛金額

学校種別	共済掛金額（円）
義務教育諸学校	920(460)

注1 2006年度の児童生徒等1人当たりの共済掛金の額（年額）

注2 （ ）内は、沖縄県における共済掛金（出所）独立行政法人日本スポーツ振興センター

このようにして算出した結果をそれぞれ表6にまとめた。シミュレーションの結果を平均すると、吹田市にいる小学校の児童のVSLは、9,108,676,659.72円となり、その予算を下回れば、施策として効率的だといえる。

表6 シミュレーション別に見た確率的生命価値

火災場所	上階	吹田市児童のVSL(円)	1人当たりVSL(円)	WTP(円)	%
給食室	高学年	9,016,525,184.87	440,755.01	210.06	0.00048
	低学年	8,835,602,570.80	431,910.96	223.34	0.00052
理科室	高学年	7,466,744,765.40	364,997.06	86.59	0.00024
	低学年	8,391,679,364.72	410,210.65	95.97	0.00023
同時火災	高学年	10,115,228,838.50	494,462.96	331.03	0.00067
	低学年	10,826,279,234.05	529,221.26	322.76	0.00061
全平均		9,108,676,659.72	445,259.65	211.63	0.00042

7-3 実際に吹田市の小学校に導入した場合の試算

実際に小学校に導入した場合の費用について大阪府吹田市内にある小学校36校を例に試算を行った。

各小学校での各機器の配置は、シミュレーションで用いた配置図をもとにして、各小学校の平面図を使ってICタグリーダー、モニタ、情報を集中管理するコンピュータ（サーバ）の配置を仮定した。これらの関係は図21に示すとおり、ICタグはICタグリーダーによって読み取られ、その情報は集中管理するコンピュータへ送られた後、モニタへ階段の混雑状況の情報として送られることを前提としている。

また、火災発生箇所として給食室、理科室、家庭科室を想定し、モニタをこれらの教室前に設置することを仮定した。これは、シミュレーションの中では盛り込めなかった箇所であるが、実際に避難訓練において火災発生場所となることが多いので、火災室を通過する前にICタグで避難情報を与えることができれば有用だと考える。また、ICタグについては、各児童が所持することを前提としている。森嶋ら（2004）によるとICタグリーダーは、三点測量によって半径2から3メートル範囲内のタグの位置を特定できることから、設置箇所には3つ配置することを前提とした。また、情報を集中管理するパソコンは、電源が切れた場合

を考慮して、1校につき2台購入するものとした。

各機器の価格については、一般の売価に従い、単価で見積りを算出した。これらの前提のもとに試算した結果は、表7のようになる。総計すると約4億8,868万円の初期費用が必要とされる。このシステムを導入してから10年運用されるとし、ICタグのみ新入学生が毎年購入するとすれば、初期費用と合わせて、9億4,896万円である。年間でみると9,490万円で運用できることになる。確かに、その他の工事費など運用には費用がかかるが、こうした費用は、タグの値段の下落、タグの大量購入による単価の下落、防犯用に既に使用されているICタグとの連携によって相殺されるものとする。

吹田市にいる小学校の児童の年間VSLは、約91億円であったので、そのVSLの約96分の1で運用することができることになる。

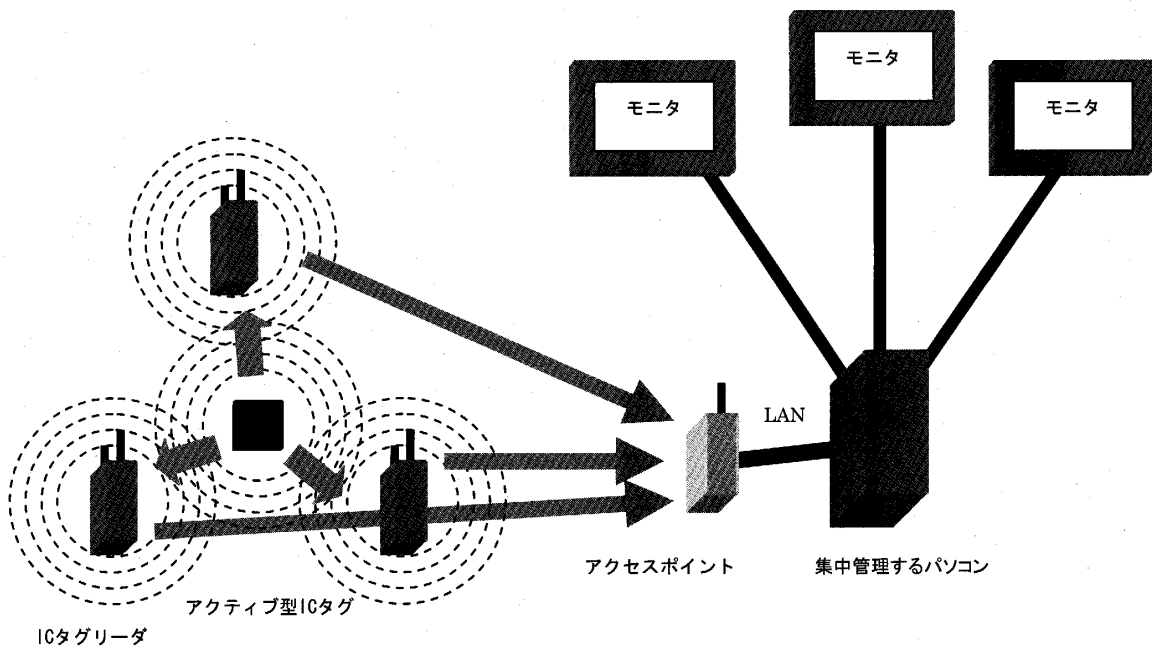


図21 デバイスの連携イメージ

表7 小学校にICタグを導入した場合の試算

	必要数	価格(円)	合計金額(円)
アクティブ型ICタグ	20,457	2,500	51,142,500
ICタグリーダー	939	260,000	244,140,000
モニタ	644	250,000	161,000,000
情報を集中管理するパソコン	72	150,000	10,800,000
位置検知ソフトウェア	36	600,000	21,600,000
		総額(円)	488,682,500

$$VSL = \frac{\text{リスク削減率に対する } WTP}{RR}$$

$$\text{リスク削減率に対する } WTP = VSL \times RR$$

このようにすると、リスク削減率に対する WTP は、3,853,058.97円となり、吹田の児童数 20,457人で除算すると、1人あたりの WTP が188.35円となる。つまり、1人あたりの WTP が 188.35円以上であれば、この施策が効率的であることになる。

8. まとめ

本稿では、建部らが行った単独避難の経路選択傾向のデータをもとにしてマルチエージェントシミュレーションモデルを構築し、IC タグの有無による児童エージェントの避難行動の差異について、回避率と時間を中心に考察し、また確率的生命価値の仮説から設置費用についても試算を行った。

その結果、火災避難行動を取る際に IC タグを使用することで回避率と避難時間が向上することがわかった。

しかし、確率的生命価値の推定については、0.00042%というリスクに対して実際に188.35円以上の WTP があるかどうかを保護者に対してアンケートを取るなどして再度検証を行う必要がある。

また、実際に IC タグを吹田市の小学校に導入するという仮定で試算を行ったが、本年に入ってから IC タグを導入して児童の登下校の様子を保護者に知らせる防犯目的で利用する小中学校が増えてきており、こうしたサービスと併用することで初期の導入費用を抑えることができると思われる。

モデルの課題として、現在の我々のモデルは、学年別に児童エージェントを区別しているが、個性の少ないシンプルなモデルとなっている。また、鈴木ら（2005）が行っている火災に対する判断についての研究では、誘導型の避難訓練によって、「指示待ち」の児童が多いことが報告されている⁷⁾。これらをもとに、児童エージェントに年齢という属性を持たせ、それを基準に行動ルールを変化させれば、より現実に即したモデルの構築が可能であると考えられる。また、児童エージェントを取り巻く環境も変えていく必要がある。火災発生からの経過時間に応じて避難経路の環境を動的に変化させることで、エージェントの行動ルールも動的に変化する。これらは今後の課題となった。

シミュレーションを行うメリットとして、最近では、学校施設の高層化が進められており、関西大学においても幼稚園、小学校、中学校、高等学校、大学、大学院、生涯教育を1つの学舎で行う目的で30階の超高層ビルの建設が予定されている。このような施設において

実証実験を行えば、初期段階にかなりの費用がかかるものと考えられる。しかし、IC タグの導入の効果は、実際に IC タグを導入して大規模な実験を行うまでもなく、我々の提示したシミュレーションモデルを更に精緻化することで検証出来ると考える。

確かに、本稿で得られた結果は、小学校を対象として得られたものであるが、この結果は、その一般性から、学校、病院、市役所、コンサートホールなどの公共施設に適用可能であるばかりでなく、より私的な施設、たとえばデパートや商業ビルなどでの適用も将来的に可能である。

シミュレーションモデルで検証する場合のコストは、対象の施設（建物）の大小に比例しない。むしろシミュレーションが対象とする施設の規模が大きくなればなるほど、または、施設外、すなわち、地域にまで対象を拡大するほど、そのコストパフォーマンスは大きくなる。IC タグを公共目的に利用する目的で、その効果を出来るだけ低コストで検証する場合、本稿で示したようなマルチエージェントシミュレーションの必要性が高まる。

謝 辞

本稿で用いたマルチエージェントシミュレータ、*artisoc* は株式会社構造計画研究所から貸与して頂いた。また、青森公立大学の小野崎保先生からはシミュレーションに対して、釧路公立大学の内藤徹先生からは経済分析に対してコメントを頂いた。さらに関西大学の徳常泰之先生からは小学校を対象にした保険料についてご教示頂いた。ここに記して、感謝する。もちろんありうべき誤りは、著者らの責である。

注

- 1) IC タグの情報は、IC タグリーダによって読み取られた後、情報を集中管理するコンピュータに集められる。その後、火災室の情報とともに総合的に判断された結果がモニタエージェントに表示されることを想定している。モニタエージェントの指示に従う確率は、高学年ほど高くなるように設定した。
- 2) 実際には建部らが行った単独避難の経路選択傾向のデータで示された割合（確率）により与えている。
- 3) 低学年になるほど U ターンする確率を高く設定している。
- 4) 高学年ほど、最寄の階段や出口を選択する確率は高く設定している。
- 5) 高学年ほど、最寄のモニタエージェントを選択する確率は高く設定している。
- 6) モニタの情報を正確に判断して避難できる児童は低学年ほど低くなるものと予測されるので、低学年になるほどモニタエージェントの情報を無視する割合を高く設定している。
- 7) 通常、小学校の避難訓練は、校内放送や担任の先生の誘導によって行われるため、「指示待ち」を選択する傾向が高い。このように、小学校では、火災時に迅速かつ適切な指示が必要とされる。2 年生、4 年生、6 年生を対象にアンケートによる避難行動予測を調査している 6 年生の火災を想定した避難行動予測で最も多かったのは「指示待ち」の 36% である。4 年生では、「指示待ち」を選択したものが 40% 以上おり、2 年生でも「指示待ち」を選択したものが 36% である。

参考文献・資料

- ・ IC タグ生徒安全確保実証実験推進グループ (2005), 『吹田市立古江台中学校用 古江台中学校生徒安全確保実証実験運用マニュアル』, IC タグ生徒安全確保実証実験推進グループ.
- ・ 新井健・増田浩通・落合哲郎 (2003), 「災害弱者を考慮したマルチエージェント避難シミュレーションモデル」, 『第3回 KKMAS コンペティション論文集』, pp.117-125, 構造計画研究所.
- ・ 椎名宏徳・中島悠・八槇博史・石田亨 (2005), 「マルチエージェントシミュレーションを利用した大規模ナビゲーション」, 『情報処理学会研究報告』, Vol.2005, No.28, pp.255-262, 情報処理学会.
- ・ 清水雅史 (2004), 「ユビキタス社会を実現する RFID の現状と課題について」, 『情報処理学会研究報告』, MBL, 29, pp.49-52, 情報処理学会.
- ・ 鈴木賢一・建部謙治 (1999), 「児童の学校空間認知と避難経路選択—学校における児童の火災避難行動に関する基礎的研究 (その2)」, 『日本建築学会計画系論文集』, No.522, pp.201-206, 日本建築学会.
- ・ 鈴木賢一・建部謙治・吉岡竜巳 (2005), 「小学校複合化施設における児童の火災避難行動に関する研究」, 『日本建築学会計画系論文集』, No.595, pp.41-47, 日本建築学会.
- ・ 滝澤修・柴山明寛・細川直史・久田嘉章 (2005), 「RFID を用いた被災情報収集支援システムの研究」, 『情報通信研究機構季報』, pp. 247-263, Vol.51, Nos.1/2, 情報通信研究機構.
- ・ 建部謙治・鈴木賢一・小森圭一 (1999), 「単独避難の経路選択傾向—学校における児童の火災避難行動に関する基礎的研究 (その1)」, 『日本建築学会計画系論文集』, No.515, pp.159-164, 日本建築学会.
- ・ 独立行政法人日本スポーツ振興センター, 「災害共済給付」, <http://www.naash.go.jp/kyosai/index.html> (2006年7月6日現在).
- ・ 古川俊一・磯崎肇 (2004), 「統計的生命価値と規制政策評価」, 『日本評価研究』, Vol.4, No.1, pp.53-65, 日本評価学会.
- ・ 森嶋健平・今野貴洋・渡辺修平 (2004), 「RFID による位置情報技術」, 『NTT コムウェア・テクノロジー』, p.13, 電気通信協会.
- ・ 吉岡竜巳・建部謙治 (2004), 「火災時における児童の避難行動に関する研究—避難シミュレータの開発と有効性について」, 『日本建築学会計画系論文集』, No.579, pp.39-44, 日本建築学会.
- ・ T.T.Lie., (1974), “Probabilistic aspects of fire in buildings”, Technical Paper No.422 of the Division of Building Research. (邦訳: 佐藤博臣 (1976), 「確率論的見地からみた建物火災」, 『建築雑誌』, Vol.91, No.1108, pp.616-618, 日本建築学会.)